

# Analyse des Potentials der Optimierung topologischer Maßnahmen anhand von linearen Sensitivitätsfaktoren

Andrea Ewerszumrode<sup>1</sup>, Niklas Erle, Lukas Kalisch, Simon Krahl, Albert Moser

FGH e.V., Roermonder Str. 199, 52072 Aachen, +49 241 997857-153,  
andrea.ewerszumrode@fgh-ma.de, <https://www.fgh-ma.de/>

**Kurzfassung:** Maßnahmen zur Anpassung der Netztopologie können als kostengünstiges Mittel zur Reduktion und Vermeidung von Netzengpässen eingesetzt werden. Dazu ist eine Integration der Maßnahmenermittlung in die Prozesse der Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) notwendig. So können die verfügbaren Maßnahmen wie Redispatch, Anpassung der Stufenstellung von Transformatoren und topologische Maßnahmen aufeinander abgestimmt und effizient eingesetzt werden. Zeitliche Restriktionen der Prozesse des operativen Engpassmanagements stellen hohe Anforderungen an die Simulations- und Optimierungsverfahren. Häufig werden daher Sensitivitätsberechnungen verwendet, um Effekte von Ausfällen und Engpassmanagement-Maßnahmen (EMM) wie Redispatch oder Trafostufungen zu approximieren. Die Auswirkungen topologischer Maßnahmen auf die Lastflusssituation im Netz kann ebenfalls approximiert werden. In diesem Beitrag erfolgt daher eine Optimierung der Netztopologie basierend auf linearen Sensitivitätsfaktoren. Anhand von Untersuchungen an einem IEEE-39-Knoten Netz wird die Eignung der sensitivitätsbasierten Approximationen für die Optimierung topologischer Maßnahmen untersucht. Dazu werden die (n-1)-Engpassleistung vor und nach Anpassung der Netztopologie verglichen. Anschließend erfolgt eine Untersuchung der Approximationsgüte bei der Ermittlung der (n-1)-Engpassleistung. Die Untersuchungen zeigen das signifikante Potential des Einsatzes von topologischen Maßnahmen zur Reduktion der Engpassleistung. So konnte in 91,1% der betrachteten Netznutzungsfälle (NNF) die (n-1)-Engpassleistung durch die optimierten topologischen Maßnahmen reduziert werden.

**Keywords:** Topologische Maßnahmen, Redispatchsimulationen, Schaltzustandsoptimierung, Übertragungsnetzbetrieb, Gemischt-ganzzahlige Optimierung

## 1 Motivation

Die energiepolitischen Entwicklungen der vergangenen Jahre, sowie aktuelle und zukünftig geplante Entwicklungen im Energiesektor führen zu stetigen Transformationsprozessen bei den Übertragungsnetzbetreibern. Der Ausbau der Erzeugung aus regenerativen Energiequellen erfolgt überwiegend fern der Lastzentren und bedingt somit hohe Transportbedarfe. Da der Netzausbau jedoch mit langwierigen Planungsverfahren verbunden ist und nur langsam voranschreitet, stehen nicht immer ausreichend Übertragungskapazitäten zur Verfügung. Folglich kommt es zu Engpässen im Stromnetz, denen ÜNB durch geeignete Maßnahmen entgegenwirken, um die Netzsicherheit zu gewährleisten. [1,2]

---

<sup>1</sup> Jungautorin

Die Ermittlung geeigneter Maßnahmen erfolgt in Vorschauprozessen des operativen Engpassmanagements. Im Rahmen des Übertragungsnetzbetriebs erfolgt die Maßnahmenauswahl basierend auf Optimierungsmethoden. Innerhalb der Prozesse des operativen Engpassmanagements werden insbesondere Anpassungen des Kraftwerkseinsatz (Redispatch), sowie der Einsatz von Netzreservekraftwerken und Transformatorstufen optimiert. Topologische Maßnahmen, welche die Konfiguration der Netzbetriebsmittel und damit den Schaltzustand des Netzes beeinflussen, werden häufig basierend auf der Betriebserfahrung zuständiger Schaltungeningenieure ausgewählt. Um das Potential der topologischen Maßnahmen zur Vermeidung von Netzengpässen im Netzbetrieb besser auszunutzen, ist eine optimierte Auswahl topologischer Maßnahmen sinnvoll. Die Auswahl im operativen Engpassmanagement hat gemeinsam mit den weiteren verfügbaren Maßnahmen zu erfolgen, um aufeinander abgestimmte EMM zu ermitteln. Dazu sind Modelle und Verfahren erforderlich, welche die Prozessanforderungen erfüllen. Insbesondere sind die zeitlichen Restriktionen der Prozesse einzuhalten.

Sensitivitätsbasierte Verfahren werden in den Prozessen des operativen Engpassmanagements bereits zur Ausfallapproximation und Ermittlung geeigneter Redispatchmaßnahmen eingesetzt. Nachfolgend wird daher ein Verfahren zur sensitivitätsbasierten Optimierung von topologischen Maßnahmen vorgestellt. Dabei wird insbesondere die Auswirkung der optimierten topologischen Maßnahmen auf die gesamte Engpassleistung ermittelt, um das Potential der sensitivitätsbasierten Topologieoptimierung zu bewerten. Weiterhin wird untersucht, inwieweit Linearisierungsfehler der Sensitivitäten zu einer Verschlechterung des Ergebnisses führen können. [2, 3, 4]

## 2 Maßnahmen zur Anpassung der Netztopologie

Das Energiewirtschaftsgesetz (EnWg) sieht nach §13 verschiedene Maßnahmen zur Beseitigung von Gefährdungen und Störungen der Netzsicherheit vor. Den Netzbetreibern steht demnach folgender Maßnahmenkatalog zur Verfügung:

- 1.) Netzbezogene Maßnahmen (insb. Netzschaltungen)
- 2.) Marktbezogene Maßnahmen (insb. durch Regelernergie, Maßnahmen nach § 13a Absatz 1, abschaltbare und zuschaltbare Lasten)
- 3.) Zusätzliche Reserven (insb. Netzreserve nach § 13d und Kapazitätsreserve nach § 13e)

Gegenstand der Untersuchungen dieser Veröffentlichung sind topologischen Maßnahmen, die laut EnWg den netzbezogenen Maßnahmen zugeordnet werden. [5] Topologische Maßnahmen umfassen Änderungen von Schaltzuständen im Netz und damit die Änderung der Netztopologie durch Schalthandlungen. Betriebliche Schaltmaßnahmen, die zur Anpassung der Netztopologie eingesetzt werden können, lassen sich auf elementare Schalthandlungen zurückführen. Die einzelnen Elementarmaßnahmen sind in Abbildung 1 dargestellt. [2, 6]

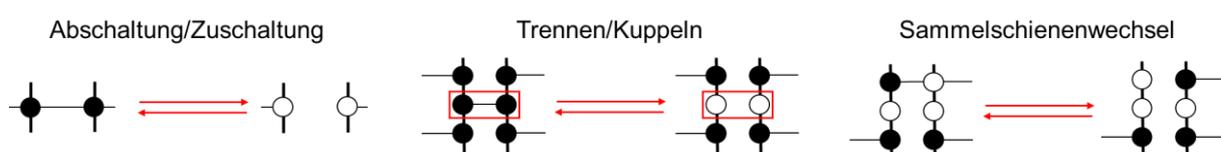


Abbildung 1: Elementare Schalthandlungen [6]

Topologische Maßnahmen bieten den Vorteil, dass sie für die Netzbetreiber nicht mit direkten Kosten verbunden sind. Jedoch können durch das Schalten die Kosten für Verlustenergie steigen. Außerdem führt jede Schalthandlung zu Alterung und Verschleiß des Schaltgeräts, wodurch insbesondere die Isolationsfähigkeit des Betriebsmittels abnimmt. Verglichen mit Maßnahmen, die eine Anpassung der Last- und Einspeisesituation erfordern, sind die Kosten jedoch gering. [2, 7]

## 2.1 Approximation des Leistungsflusses (Sensitivitätsberechnung)

Durch geringe Vorlaufzeiten im Rahmen der Prozesse des operativen Engpassmanagements sind schnelle Rechenzeiten erforderlich. Da vor allem die Berechnung von Leistungsflüssen durch das Lösen nichtlinearer Gleichungssysteme rechenintensiv ist, werden in den Simulationen häufig Näherungen der Leistungsflussgleichungen verwendet.

Mittels Sensitivitätsberechnung wird basierend auf einem gültigen Leistungsflussergebnis eine Näherungslösung durch Linearisierung im Arbeitspunkt ermittelt. So werden die Effekte geringer Änderungen der Netztopologie oder der Last- und Einspeisesituation simuliert. Die Einflüsse auf die Zustandsvariablen werden mittels der Inversen der Funktionalmatrix berechnet, wie in Gleichung 1 dargestellt. Dazu erfolgen Leistungsinjektionen, die Änderungen der Topologie oder der Einspeise- und Lastsituationen modellieren. [3, 8]

$$\begin{pmatrix} \Delta U \\ \Delta \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial U}{\partial P} & \frac{\partial U}{\partial Q} \\ \frac{\partial \theta}{\partial P} & \frac{\partial \theta}{\partial Q} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix} = J^{-1} \cdot \vec{S}^{inj} \quad (1)$$

Die Matrixelemente repräsentieren Einflüsse von Wirk- und Blindleistungsänderungen auf Betrag und Phase der komplexen Knotenspannungen. Mithilfe von Formel 2 werden die resultierenden Stromflüsse auf den Zweigen des Netzes bestimmt. [9, 10]

$$\vec{I} = \underline{Y}_N \cdot \vec{U} \quad (2)$$

Zur Ermittlung des Leistungsflusses nach o.g. Veränderungen werden die linearisierten Auslenkungen der Ströme und Spannungen der Basissituation überlagert, wie in Abbildung 2 für den Ausfall einer Leitung dargestellt. [3, 8]

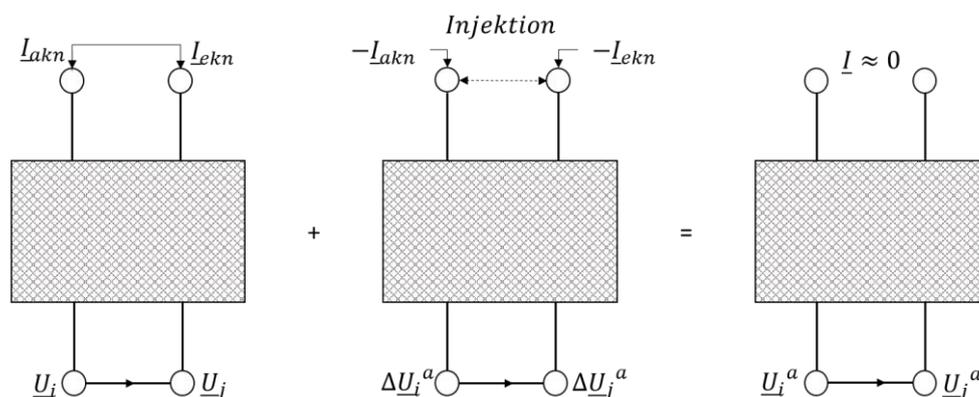


Abbildung 2: Superposition nach Zweigausfall [3]

Die Näherungen werden zum Lösen von Security Constrained Optimal Power Flow Problemen verwendet. Es gilt jedoch zu beachten, dass nicht alle Änderungen durch die Näherungslösung abgebildet werden. Die Effekte der Blindleistungseinspeisung zur Spannungsregelung werden beispielsweise vernachlässigt. Die Approximationen eignen sich außerdem zur Ermittlung der Effekte topologischer Maßnahmen. [3]

### 3 Modell

Zur Optimierung topologischer Maßnahmen ist zunächst eine geeignete Modellierung zu finden. In diesem Beitrag wird auf die Modellierung topologischer Maßnahmen über linearisierte Sensitivitätsfaktoren fokussiert. Nach einer initialen Lastflussberechnung erfolgt die Ermittlung der Ströme nach Ausfällen und topologischen Maßnahmen mittels Sensitivitätsberechnung. Die Auswirkungen der Schalthandlungen werden in der Optimierung durch Line Outage Distribution Factors (LODFs) und Line Closure Distribution Factors (LCDFs) modelliert. Die Auswirkungen von Ausfällen und topologischen Maßnahmen werden superponiert.

#### 3.1 Approximation von Ausfällen und Öffnen von Kupplungen

Mithilfe von Approximationen soll der Fluss auf einem Zweig im (n-1)-Fall ermittelt werden, ohne einen neuen Lastfluss zu berechnen. Der betrachtete Fall ist in Abbildung 3 dargestellt. Der Ausfall eines Zweiges  $\beta$  verursacht eine Flussänderung auf Zweig  $\alpha$ .

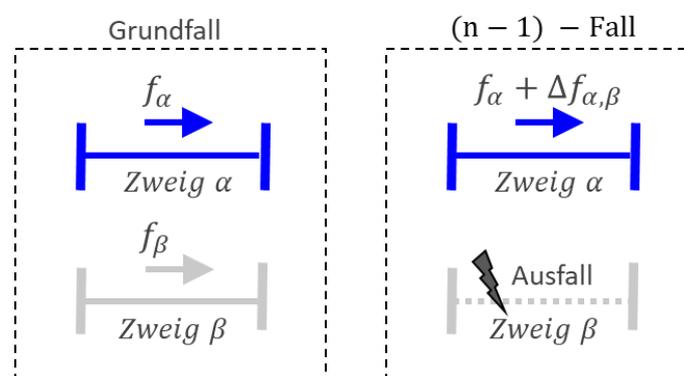


Abbildung 3: Zweigausfall

Durch Sensitivitätsberechnung wird der Fluss  $f_{\alpha}^{Ausfall}$  auf einem Zweig  $\alpha$  bei Ausfall eines Zweiges  $\beta$  approximiert. Anschließend ist die Ermittlung der Flussänderung  $\Delta f_{\alpha,\beta}$  auf Zweig  $\alpha$  möglich, die durch den Ausfall verursacht wird. Basierend auf der Flussänderung  $\Delta f_{\alpha,\beta}$  und dem initialen Fluss  $f_{\beta}$  über Zweig  $\beta$  werden die LODFs anhand Formel 3 ermittelt.

$$d_{\alpha,\beta} = \frac{\Delta f_{\alpha,\beta}}{f_{\beta}} \quad (3)$$

Der Zusammenhang zwischen  $f_{\alpha}^{Ausfall}$  auf Zweig  $\alpha$  und dem LODF  $d_{\alpha,\beta}$  ist in Formel 4 dargestellt.

$$f_{\alpha}^{Ausfall} = f_{\alpha} + \Delta f_{\alpha,\beta} = f_{\alpha} + d_{\alpha,\beta} \cdot f_{\beta} \quad (4)$$

Das Öffnen von Kupplungen wird analog zu einem Ausfall modelliert, sofern die Kupplung als Zweig mit sehr geringer Impedanz modelliert wird. [11]

### 3.2 Approximation für das Kuppeln von Sammelschienen

Auch die Effekte des Schließens von Sammelschienenkupplungen werden ohne erneute Lastflussberechnung approximiert. Die Kupplungen werden für die Simulation als Zweige mit sehr geringer und daher zu vernachlässigender Impedanz modelliert. Abbildung 4 zeigt die zu modellierende Situation. Die Effekte des Einschaltens eines Zweigs  $\beta$  auf den Zweigfluss über Zweig  $\alpha$  sollen ermittelt werden.

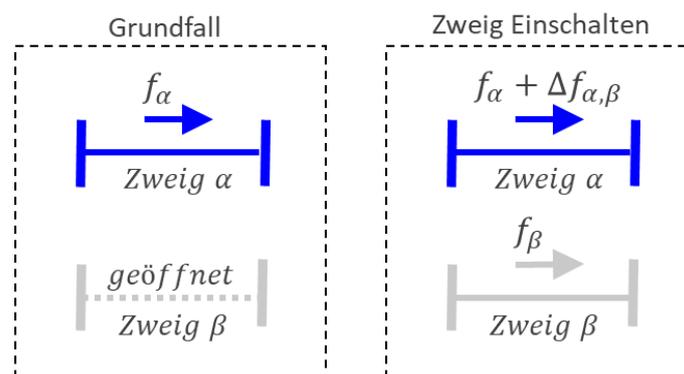


Abbildung 4: Einschalten eines Zweigs

Zur Approximation der Zweigflüsse nach dem Kuppeln zweier Sammelschienen, ist es zunächst notwendig den Stromfluss zu ermitteln, der nach dem Kuppeln über die Kupplung fließt. Da offene Kupplungen und Zweige in Lastflussberechnungen üblicherweise als hochohmige Verbindungen modelliert und daher vernachlässigt werden, ist zunächst die Approximation des Stroms über die Kupplung, nachdem sie geschlossen wird, notwendig. Das hierzu verwendete Modell ist in Abbildung 5 dargestellt.

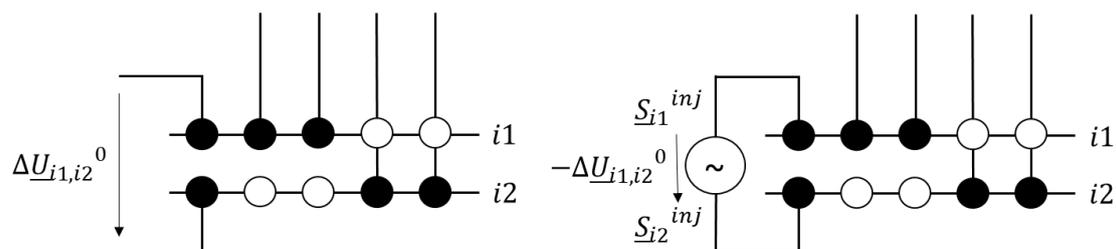


Abbildung 5: Modell für das Schließen einer Kupplung [11]

Unter der Annahme, dass für die direkte Verbindung zweier elektrischer Knoten die Gleichung  $\underline{U}_{i1} = \underline{U}_{i2}$  gilt, muss der Strom  $\underline{I}_S$  über die Kupplung den Spannungsabfall  $\Delta \underline{U}_{i1,i2}$  zwischen den Sammelschienen kompensieren. Unter dieser Annahme kann der Strom anhand Formel 5 ermittelt werden. Dabei ist  $\underline{Z}_N^{i1,i2}$  die Netzimpedanz der Thevenin Ersatzschaltung. Die genaue Herleitung der Formel ist in Eickmann et al. (2015) zu finden. [11]

$$\underline{I}_S = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\underline{U}_{i1}^0 - \underline{U}_{i2}^0}{\underline{Z}_N^{i1,i2}} \quad (5)$$

Auf Basis des berechneten Stroms können anschließend die Leistungsinjektionen gemäß der Formeln 6 & 7 berechnet werden.

$$S_{j1}^{inj} = -\sqrt{3} \cdot U_{j1}^0 \cdot I_S^* \quad (6)$$

$$S_{j2}^{inj} = \sqrt{3} \cdot U_{j2}^0 \cdot I_S^* \quad (7)$$

Diese Leistungen werden zur Leistungsinjektion basierend auf der Netztopologie vor Kuppeln der Sammelschienen durchgeführt. Anschließend werden mittels Sensitivitätsberechnung resultierende Spannungen und Ströme nach Kuppeln der Sammelschienen ermittelt. [2, 11]

## 4 Optimierung

Ziel des Optimierungsproblems ist die Auswahl von Schaltzuständen, die die Überlastungen im (n-1)-Fall am stärksten reduzieren. Dazu wird der (n-1)-Engpassstrom als Summe der Ströme definiert, die im (n-1)-Fall oberhalb der Auslastungsgrenzen der Zweige auftritt. Diesen Strom gilt es zu minimieren. Beträgt der Engpassstrom Null, liegen keine Überlastungen im (n-1)-Fall vor und es sind keine Maßnahmen notwendig. Äquivalent hierzu lässt sich die Engpassleistung definieren.

Zur Formulierung des Optimierungsmodells werden zunächst Entscheidungsvariablen  $\partial_i$  für umzusetzende Schaltzustände definiert. Ein Variablenwert von Null stellt ein Beibehalten des ursprünglichen Schaltzustandes dar, während ein Variablenwert von 1 eine Änderung des Schaltzustandes repräsentiert. Um die Überschreitung des Stromgrenzwerts und so auch die Überlastung abhängig vom Schaltzustand zu ermitteln, wurden zwei Variablen  $E_j^+$  und  $E_j^-$  definiert. Diese Variablen enthalten die Überschreitung in positive und negative Flussrichtung für alle betrachteten Zweige  $j$ . Zur Approximation des Stromes abhängig von der Anpassung der Netztopologie wird die Variable  $I_{opt,j}$  definiert. Die Optimierungsvariablen sind nachfolgend in Tabelle 1 aufgeführt.

Variable	Beschreibung
$\partial_i \in \{0; 1\} \forall i$	Entscheidungsvariablen für umzusetzende Schaltzustände ( $i$ )
$E_j^+, E_j^- \in \{\mathbb{R}^+\} \forall j$	Überschreitungen in positive oder negative Flussrichtung für alle relevanten Zweige $j$
$I_{opt,j} \in \{\mathbb{R}\} \forall j$	Strom nach Umsetzung der Schaltzustände für alle relevanten Zweige $j$

Tabelle 1 Optimierungsvariablen

Als weitere Eingangsdaten für die Optimierung gelten die in Tabelle 2 aufgeführten Konstanten. Der bisherige Stromfluss  $I_{initial,j}$  eines Zweiges  $j$  ist ein Ergebnis der initialen Lastflussrechnung. Die Konstante  $I_{Limit,j}$  enthält den Stromgrenzwert eines Zweiges  $j$  und ist eine der Kenngrößen des Netzes. Außerdem wird durch die Konstante  $\partial_{Limit}$  eine Grenze für die Anzahl umzusetzender Schaltheandlungen in der Optimierung vorgegeben.

<i>Konstante</i>	<i>Beschreibung</i>
$I_{initial,j}$	Bisheriger Stromfluss auf Zweig j
$I_{Limit,j}$	Limit für Stromfluss auf Zweig j
$\Delta I_{j,n-1}$	Stromänderung auf Zweig j im (n-1)-Fall
$\Delta I_{j,i,n-1}$	Stromänderung auf Zweig j im (n-1)-Fall bei Umsetzen der Schaltung i
$\partial_{Limit}$	Limit für Anzahl umzusetzender Schalthandlungen

Tabelle 2 Optimierungskonstanten

Initial müssen vor Aufbau des Optimierungsproblems die relevanten Zweig-Ausfall-Kombinationen ermittelt werden, die zur höchsten Auslastung auf den betrachteten Zweigen führen. Aus der Kombination resultiert die Änderung des Stroms im (n-1)-Fall  $\Delta I_{j,n-1}$ , der sensitivitätsbasiert anhand von LODFs berechnet wird. Für jeden möglichen Schaltzustand lässt sich außerdem die (n-1)-Stromänderung bei Anpassung der Netztopologie  $\Delta I_{j,i,n-1}$  approximieren. Die Ermittlung der Stromänderungen erfolgt basierend auf LODFs und LCDFs wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben.

Das Ziel der Optimierung ist es, Grenzwertüberschreitungen im (n-1)-Fall bestmöglich zu reduzieren. Zu diesem Zweck werden die Grenzwertüberschreitungen  $E^+_j$  und  $E^-_j$  abhängig vom Schaltzustand für jeden betrachteten Zweig ermittelt. Dazu ist der Strom nach Anpassung der Netztopologie  $I_{opt,j}$  zu bestimmen. Dazu wird die folgende Nebenbedingung (8) formuliert.

$$I_{opt,j} = I_{initial,j} + \Delta I_{j,n-1} + \left( \sum_i \partial_i \cdot (\Delta I_{j,i,n-1} - \Delta I_{j,n-1}) \right) \forall j \quad (8)$$

Anhand des so berechneten Stroms können die Grenzwertüberschreitungen mittels (9) und (10) berechnet werden.

$$I_{opt,j} \leq I_{Limit,j} + E^+_j \quad \forall j \quad (9)$$

$$I_{opt,j} \geq -I_{Limit,j} - E^-_j \quad \forall j \quad (10)$$

Ziel der Optimierung ist die Minimierung der Summe der Grenzwertüberschreitungen  $E^+_j$  und  $E^-_j$  über alle relevanten Zweige, wie in der Zielfunktion (11) dargestellt.

$$\min z = \sum_j E^+_j + E^-_j \quad (11)$$

## 5 Untersuchungsergebnisse

Die Modellierung topologischer EMM mittels linearer Sensitivitätsfaktoren wird anhand eines modifizierten IEEE-39-Knoten Netzes untersucht. Modifikationen des Netzes umfassen die Erweiterungen des Netzes um Doppelsammelschienen und Querkupplungen, sowie zusätzliche Leitungen zur Erhöhung des Vermaschungsgrads. Für die Untersuchungen erfolgten Berechnungen anhand von 2000 synthetischen NNF. Für die Auswertung erfolgte eine Umrechnung der Engpassströme aus der Optimierung in Engpassleistungen.

## 5.1 Ergebnisse der Topologieoptimierung

In allen 2000 betrachteten NNF bestanden initial Überlastungen im (n-1)-Fall. In 1911 dieser Fälle wurde anhand der Topologieoptimierung eine Maßnahme identifiziert, welche die gesamte (n-1)-Engpassleistung reduzieren sollte. In 1821 Fällen (91,1%) konnte nach der Optimierung eine Verringerung der Engpassleistung festgestellt werden. In 90 Fällen (4,5%) kam es zu einer Erhöhung. Die (n-1)-Engpassleistung nach Topologieoptimierung bezogen auf die initiale (n-1)-Engpassleistung für jeden Netznutzungsfall ist in Abbildung 6 dargestellt.

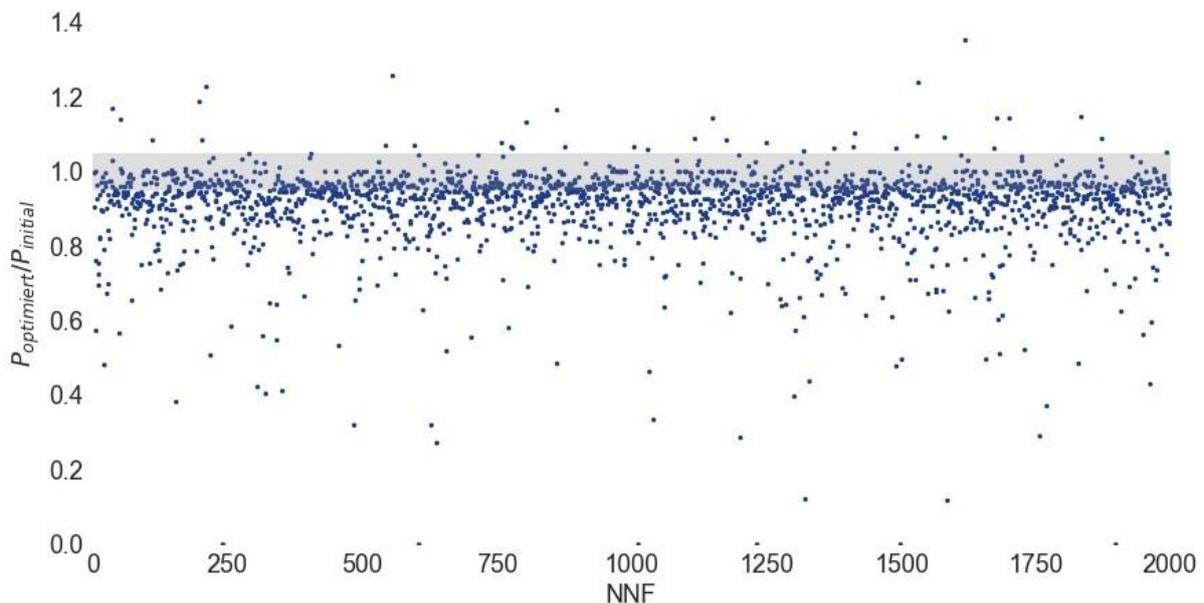


Abbildung 6: (n-1)-Engpassleistung nach Topologieoptimierung bezogen auf die initiale (n-1)-Engpassleistung

Im Rahmen der Untersuchungen wurden Änderungen der Engpassleistung von weniger als 5% als nicht signifikante Änderungen bewertet. Der entsprechende Bereich ist im Diagramm grau unterlegt. Zu signifikanten Erhöhungen kommt es dementsprechend in 36 NNF (1,8%), signifikante Verringerungen der Engpassleistung wurden in 1215 NNF (60,8%) festgestellt. In 179 (9%) der NNF wurde eine Reduktion um mehr als 20% erzielt.

Grund für auftretende Erhöhungen, obwohl die Optimierung der Minimierung der Engpassleistung dient, sind Ungenauigkeiten der Approximation. Die Güte der Approximation wird daher nachfolgend genauer untersucht.

## 5.2 Güte der Approximation

In der Zielfunktion der Optimierung erfolgt eine sensitivitätsbasierte Berechnung der Engpassleistung basierend auf den möglichen Anpassungen der Netztopologie. Durch die sensitivitätsbasierte Berechnung kann es zu Abweichungen von der tatsächlichen Engpassleistung bei Anpassung der Netztopologie kommen. Zur Bewertung der Approximationsgüte werden beide Ergebnisse für die 1911 NNF, in denen Topologiemassnahmen angewendet werden, verglichen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 aufgetragen. Zur Übersichtlichkeit wurden in der Abbildung die NNF anhand ihrer (n-1)-Engpassleistung nach Anwendung der Topologiemassnahmen und erneuter Lastflussberechnung und Ausfallapproximation aufsteigend sortiert.

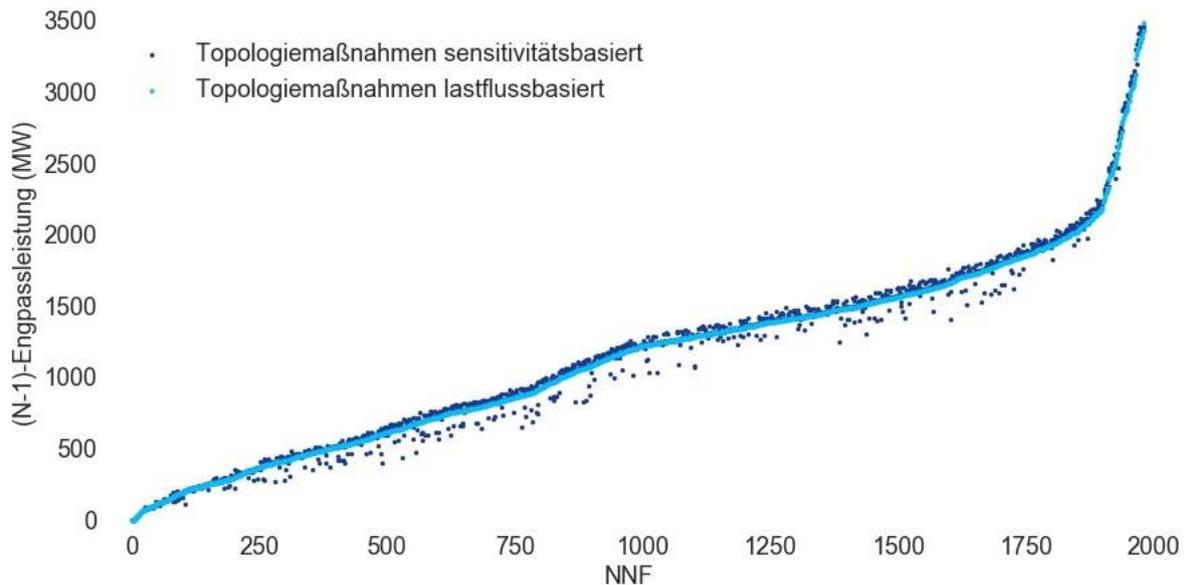


Abbildung 7: Abweichung der (n-1)-Engpassleistung

Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass die Approximation in einer Vielzahl der betrachteten NNF relativ nah an dem Ergebnis von Lastfluss und erneuter Ausfallapproximation liegt. Vereinzelt treten jedoch auch größere Abweichungen auf. Vor allem die Fälle, in denen die Engpassleistung unterschätzt wird, sind in der Abbildung gut zu erkennen. Die Verteilung ist anhand der Quantile in Tabelle 3 dargestellt.

25% Quantil	3,18 MW
50% Quantil	6.63 MW
75% Quantil	38.56 MW

Tabelle 3: Quantile der absoluten Abweichung der (n-1)-Engpassleistung

Die Abweichungen lassen sich durch die Linearisierungsfehler der Approximationen erklären. Detailuntersuchungen der Ergebnisse zeigen, dass trotz der Linearisierungsfehler die approximierte Engpassleistung im Großteil der betrachteten NNF korrekt zeigt, ob eine topologische Maßnahme zur Reduktion der Engpassleistung führt. In nur 90 NNF kam es zu einer Erhöhung der Engpassleistung nach Einsatz der topologischen Maßnahmen. In nur 1,9% der NNF wurde diese Erhöhung als signifikant bewertet.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Veränderte Transportbedarfe in Übertragungsnetzen führen zum steigenden Einsatz von EMM zur Gewährleistung der Netzsicherheit. Der Einsatz topologischer Maßnahmen ist für die ÜNB besonders kostengünstig, wird allerdings in Prozessen des operativen Engpassmanagements bisher nicht optimiert betrachtet. Eine Optimierung zum abgestimmten Einsatz mit anderen EMM ist sinnvoll, um einen effizienten Maßnahmeneinsatz zu gewährleisten. Da in bestehenden Prozessen häufig Näherungslösungen des Leistungsflusses basierend auf Sensitivitätsberechnungen verwendet werden, soll die Eignung dieser Approximationen zur Optimierung topologischer Maßnahmen untersucht werden.

Die Optimierung der topologischen Maßnahmen erfolgt anhand der Auswirkungen auf die Zweigströme im (n-1)-Fall, die mittels LODFs und LCDFs modelliert werden. Die LODFs und LCDFs werden mittels Sensitivätsberechnung ermittelt. Ziel der Optimierung ist die Minimierung der (n-1)-Engpassleistung durch den Einsatz topologischer Maßnahmen.

Die Optimierung wurde anhand eines modifizierten IEEE-39-Knoten Netzes mit 2000 synthetischen NNF untersucht. Die Untersuchungen zeigen, dass im überwiegenden Teil der NNF eine topologische Maßnahmen ermittelt wird, welche die (n-1)-Engpassleistung reduziert. In 60,8% dieser NNF bewirkt die ausgewählte topologische Maßnahme eine Reduktion um mehr als 5%. In 9% der NNF, in denen eine Maßnahme umgesetzt wurde, wird durch Einsatz der Maßnahme eine Reduktion um mehr als 20% erreicht. Die Optimierung anhand sensitivitätsbasierter Berechnungen zeigt damit ein großes Potential zur Auswahl geeigneter Maßnahmen zur Reduktion der (n-1)-Engpassleistung.

In einigen Fällen kam es durch Linearisierungsfehler der Approximationen zur Auswahl von Maßnahmen, die eine Erhöhung der (n-1)-Engpassleistung zur Folge hatten. Daher sollten Optionen zur Rücknahme ausgewählter topologischer Maßnahmen vorgesehen werden, um keine negativen Auswirkungen auf die Netzsituation durch auftretende Approximationsfehler zuzulassen. Dazu eignet sich beispielsweise die Verwendung von iterativen Optimierungsverfahren. Denkbar sind ebenfalls Ansätze, um anhand der Netzkonfiguration und des initialen Lastflusses jene Maßnahmen vorab zu ermitteln, deren Approximationen größere Abweichungen aufweisen. Dazu könnten beispielsweise Methoden des Machine Learning zum Einsatz kommen.

### Förderhinweis

Dieser Beitrag wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) innerhalb des Forschungsprojektes "Innovative Ansätze zur Optimierung von Topologiemassnahmen im Engpassmanagement des Netzbetriebs (InnOpTEM)" gefördert (FKZ: 03EI4056A). Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Der Inhalt spiegelt nicht notwendigerweise die konsolidierte Meinung des Konsortiums „InnOpTEM“ wider.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

### Literatur

- [1] Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina; acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V.; Union der Deutschen Akademien der Wissenschaft: "Netzengpässe als Herausforderung für das Stromversorgungssystem", 2020
- [2] A. Ewerszumrode; N. Erle; L. Kalisch; S. Krahl; A. Moser: „Verfahren zur Berücksichtigung topologischer Maßnahmen in Redispatchsimulationen“, EnInnov2022, Graz, 2022
- [3] J. Eickmann: "Simulation der Engpassbehebung im deutschen Übertragungsnetzbetrieb", Aachen, 2015
- [4] M. F. de Medeiros; A. V. Da Costa Oliveira: "Power system security by Corrective Switching", 2010
- [5] „Energiewirtschaftsgesetz: EnWG“, 4.1.2023
- [6] K. F. Schäfer: „Netzberechnung“, Wiesbaden, 2020
- [7] A. Moormann: "Ermittlung robuster Schaltzustände für den Betrieb elektrischer Übertragungsnetze“, Aachen, 2019
- [8] K. F. Schäfer: „Netzberechnung“, Wiesbaden, 2020
- [9] V. Crastan; D. Westermann: „Elektrische Energieversorgung 3“, Berlin, 2018
- [10] A. Moser: „Elektrizitätsversorgungssysteme“, Aachen, 2015
- [11] J. Eickmann; J. Kellermann; A. Moser: "Efficient Power Flow Approximation Methodology for Topology Optimization Algorithms in Transmission System Operation“, Piscataway, NJ, 2015